

УДК 628.16.08:532.528

Т.І. Веретільник, О.М. Яхно

**ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КАВІТАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ****Вступ**

Екологічні проблеми на виробництві тісно пов'язані з питаннями очищення стічних вод. За своїм складом стічні води являють собою широкий спектр рідин, які містять у собі різні хімічні елементи, органічні і неорганічні домішки, багато з яких, наприклад стічні води хімічних та нафтопереробних заводів (промислові та побутові), можуть містити токсичні речовини. Тому вміст токсичних речовин не повинен перевищувати, як мінімум, рівень гранично допустимої концентрації (ГДК).

Аналіз літературних джерел показує, що очищення стічних вод на більшості підприємств України здійснюється з використанням традиційних технологій і підходів обробкою коагулянтами і флокулянтами з наступним освітленням стоків відстоюванням, хоча більше 20 років назад у світі найперспективнішими методами очищення природних і стічних вод вважались [1]: послідовна обробка – очистка вод на декількох абсорбентах і зворотний осмос.

В Україні і в колишніх країнах Радянського Союзу на сьогодні найпоширенішими методами очищення стічних вод від забруднень є реагентні окиснювачі (наприклад, озон, хлор). Найбільш поширеним окиснювачем є молекулярний хлор і речовини, що містять “активний хлор” [2, 3].

Активний хлор, взаємодіючи з речовинами, які є у воді, бере участь у реакціях сполучення, заміщення і окиснення. Протікання цих процесів залежить як від умов проведення процесу (дози окиснювача, рН, часу контакту), так і від природи речовин, що окиснюються.

Незважаючи на простоту і компактність пристроїв для хлорування води, доступність і дешевизну хлору, метод очищення стічних вод активним хлором може мати лише обмежене застосування. Пов'язано це з недостатньою глибиною окиснення органічних домішок (до органічних кислот), утворенням токсичних хлорорганічних сполук, необхідністю застосування

високих доз активного хлору, високою токсичністю самого хлору.

Одним із найбільш перспективних напрямків у процесах окиснення органічних домішок є застосування екологічно “чистих” окиснювачів, оскільки при їх використанні не відбувається вторинне забруднення води продуктами розкладу самого реагенту. До “чистих” окиснювачів належать озон, гідроген пероксиду та кисень.

Традиційно застосування озону для глибокого очищення води вимагає вагомих затрат. Крім того, широке застосування озону на практиці водоочищення стримується наявністю в стічних водах достатньо великої кількості важкоокиснювальних органічних сполук, що не піддаються глибокому окисненню при простому озонуванні. Це призводить до утворення продуктів неповного окиснення, які можуть бути більш токсичними, ніж вихідні сполуки.

Використання озону найбільш ефективно тільки в лужних середовищах, що вимагає застосування стійких до окиснення конструктивних матеріалів. Оскільки озон токсичний (ГДК = 0,1 мг/м<sup>3</sup>), необхідно організувати систему “допалу” непрореагованого газу. Крім того, вузьким місцем процесу озонування є апаратне оформлення вузлів змішування озону з водою [3].

Гідроген пероксиду (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) є одним із найбільш ефективних і перспективних окиснювачів, що використовуються нині у водопідготовці. В останні роки він знайшов широке застосування для очищення промислових та побутових стічних вод [4]. Значний екологічний ефект від використання гідрогену пероксиду зумовлений насамперед тим, що основні продукти, які утворюються при протіканні хімічних реакцій, є нешкідливими речовинами: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.

**Постановка задачі**

Практично повсюдне погіршення якості води в природі свідчить про те, що методи очищення стічних вод, які використовують промислові підприємства, не відповідають сучасним вимогам. Виходячи із сказаного вище, необхідно шукати нові, більш перспективні технології.

У зв'язку з цим, виникає великий інтерес щодо можливості використання гідродинамічної та ультразвукової кавітації для розв'язання

технологічних і економічних задач при очищенні стічних вод.

Метою даної статті є розробка технології глибокого очищення стічних вод із використанням пристроїв для генерування кавітації як окиснювачів.

Стаття є продовженням теоретичних та експериментальних досліджень з очищення стічних вод, які були розпочаті в попередніх працях [5–7].

### Теоретична частина

В останні роки розвиток і введення нових технологій, зокрема в галузі очищення, пов'язані з кавітаційними процесами.

Розглянемо фізику кавітаційних процесів. При використанні гідродинамічної та акустичної кавітації в різних промислово-технологічних процесах необхідно кількісно оцінити її ефективність. Спочатку міркування проведемо з акустичною кавітацією. Відомо [8], що частина підведеної до рідини акустичної енергії витрачається на утворення кавітації. Очевидно, що коефіцієнт кавітаційного використання акустичної енергії – акустико-кавітаційний коефіцієнт корисної дії (ККД), становить

$$\eta = \frac{E_k}{E}, \quad (1)$$

де  $E_k$  – енергія, витрачена на утворення кавітації;  $E$  – підведена акустична енергія.

Енергія, накопичена кавітаційними бульбашками  $E_k$ , при їх коливанні перетворюється в енергію стиснення парогазової суміші в бульбашках, яка при руйнуванні бульбашок перетворюється в ударні хвилі, кавітаційний шум, сонолюмінесценцію, мікропотоки, хімічні реакції. Ці процеси, в свою чергу, викликають ерозію, очищення, емульгування і т.ін. Ефективність кожного з цих процесів можна оцінити окремо.

Наприклад, якщо позначити енергію ударних хвиль  $E_y$ , то відношення

$$\chi = \frac{E_y}{E_k} \quad (2)$$

є мірою переходу потенціальної енергії, яка накопичена кавітаційними бульбашками, в енергію ударних хвиль; цей коефіцієнт наближається до одиниці. В статті [9] середню за пе-

ріод потужність, витрачену на утворення кавітації, позначають  $W_k$ . Тоді з рівняння (1) маємо

$$W_k = \frac{E_k}{T} = \frac{\eta \cdot E}{T} = \eta W, \quad (3)$$

де  $W$  – акустична потужність, що вводиться випромінювачем у рідину;  $T$  – період коливань бульбашки.

Потужність ударних хвиль, яка виділяється кавітаційними бульбашками, обчислюється за формулою

$$W_y = \frac{E_y}{\tau_0} = \frac{E_k}{\tau_0 \cdot \chi} = \frac{\eta \cdot \chi}{\tau_0} E, \quad (4)$$

де  $\tau_0$  – час кінцевої стадії руйнування бульбашки.

Порівнявши рівняння (1) і (2), одержимо коефіцієнт переходу акустичної енергії в енергію ударних хвиль:

$$\eta_y = \frac{W_y}{W} = \eta \chi \frac{T}{\tau_0}. \quad (5)$$

Значення  $\eta$  і  $\chi$  завжди менші одиниці, але в деяких випадках вони можуть наближатися до одиниці. Відношення  $\frac{T}{\tau_0}$  може коливатися

в широких межах. Якщо коливання кавітаційних бульбашок близькі до синусоїдальних, що може мати місце як у випадку бульбашок з дуже великим вмістом газу, так і в разі, коли повний час їх руйнування  $\tau_m$  наближається до

$\frac{T}{2}$ , то це відношення невелике. Якщо в бульбашках мало газу і  $\frac{T}{\tau_m} > 1$ , то відношення  $\frac{T}{\tau_0}$

може досягати великих значень.

Міркування, проведені при виведенні формул (1)–(5), можуть бути використані також відносно будь-якого іншого кавітаційного процесу. Відомо, що кавітаційна енергія  $E_k$  виділяється як у вигляді механічної енергії ударних хвиль  $E_m$  (ерозія), так і у вигляді люмінесцентної  $E_d$  енергії утворення хімічних радикалів  $E_x$  і т.ін. Для з'ясування того, яка частина кавітаційної енергії  $E_k$  перетворюється в той чи інший вид енергії, можна ввести коефіцієнти, що характеризують ступінь використання каві-

таційної енергії. Так, величина  $\varepsilon = \frac{E_M}{E_K}$  показує

ерозійну, а  $X = \frac{E_X}{E_K}$  – хімічну активність каві-

тації і т.д. Тоді добуток  $\eta$  на будь-який із вказаних коефіцієнтів буде коефіцієнтом корисної дії кавітаційного процесу.

Процеси, що базуються на використанні вільних радикалів як окиснювачів, отримали назву АОР-процесів. Завданням удосконаленого (розширеного) процесу окиснення (АОР) є ініціювання у формуванні гідроксильних радикалів (ОН-радикалів). Цей процес усуває широкий спектр токсичних сполук і мікроскопічних забруднювачів. Гідроксил-радикал є найбільш сильним окиснювачем [10]. У таблиці наведено відносну окиснювальну здатність деяких окиснювачів.

**Таблиця.** Відносна окиснювальна здатність деяких окиснювачів

Окиснювач	Відносна окиснювальна здатність
Хлор Cl	1,00
Гіпохлоритна кислота HClO	1,10
Перманганат MnO <sub>4</sub>	1,24
Гідроген пероксиду H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,31
Озон O <sub>3</sub>	1,52
Атомарний кисень O	1,78
Гідроксил радикал OH <sup>-</sup>	2,05
Позитивно заряджений діоксид титану TiO <sub>2</sub>	2,35

На сьогодні відомі методи [10, 11], за допомогою яких можна одержати ОН-радикали. Їх можна поділити на нефотохімічні та фотохімічні методи [12]:

- 1) озон + гідроген пероксиду (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>);
- 2) озон + ультрафіолетове випромінювання (O<sub>3</sub>/УФ);
- 3) гідроген пероксиду + ультрафіолетове випромінювання (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/УФ).

Фотохімічні методи – фотоозонування (O<sub>3</sub>/УФ), а також комбінація O<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + УФ, O<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + УФ [12, 13] – є одночасно окиснювальними та фотолітичними процесами. Відносний внесок кожного з них залежить від багатьох факторів, зокрема від інтенсивності і спектра ультрафіолетового випромінювання, концентрації забруднень та їх природи.

Розглядаючи технологічні схеми АОР-процесів із кавітацією, слід відзначити, що в промислового масштабу на сьогодні реалізована одна технологічна схема, що використовує гідродинамічну кавітацію як АОР-процес. Вона отримала назву САV-ОХ-процес і була розроблена в США [14].

Технологію САV-ОХ було використано для очищення ґрунтових вод із низькими концентраціями органічних домішок. У технології задіяні: гідродинамічна кавітація, УФ-випромінювання і гідроген пероксиду як реагент для окиснення органічних забруднень у воді. В ідеалі кінцевими продуктами є СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О, галогіди, а також у деяких випадках – органічні кислоти. Основним окиснювачем є гідроксил-радикал. Утворені радикали швидко реагують з органічними забрудненнями.

### Експериментальна частина

Сучасна технологія очищення води має відповідати таким вимогам: бути екологічною, економічною і ефективною. У даній статті пропонується технологія очищення стічних вод від забруднень, в основі якої лежить кавітаційна обробка води.

Для реалізації розробленої технології очищення стічних вод пропонується така технологічна схема. На рис. 1 наведено структурну схему процесу очищення стічних вод.

Технологічна схема містить: коагуляційне осаджування домішок на першій ступені очищення стічних вод від забруднень з наступним розподілом фаз методом флотації; обробку освітлених стічних вод гідрогеном пероксиду і комплексним впливом гідродинамічної та ультразвукової кавітації на другій ступені очищення; осадок адсорбованих інтермедіатів на третій ступені очищення.

Утворення в рідині області з розвиненою кавітацією супроводжується рядом фізико-хімічних ефектів, які здатні справляти значний вплив на протікання гідро-, тепломасообмінних процесів, в тому числі на швидкість і ефективність водоочищення.

Ключовим моментом очищення стічних вод у запропонованій схемі є кавітаційна система, яка складається з кавітаційного гідродинамічного пристрою та ультразвукового генератора і ґрунтується на фізичних (безреагентних) методах обробки стічних вод. Оскільки кавітаційна система є генератором кавітації високонапірного потоку, то можна стверджувати, що

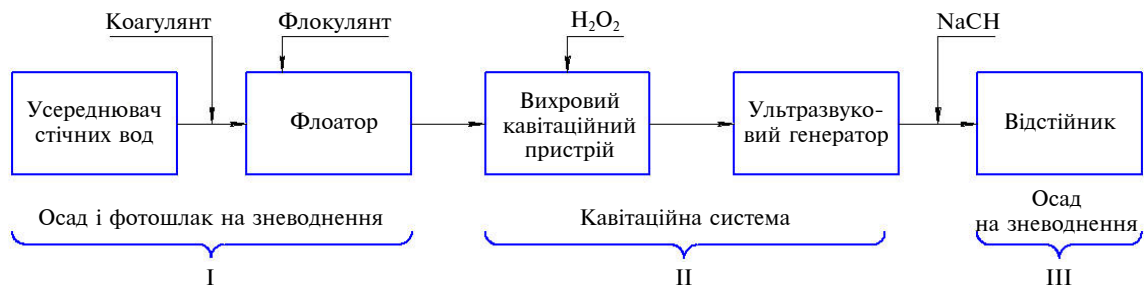


Рис.1. Структурна схема процесу очищення стічних вод

кавітація в даному випадку є основним джерелом гідроксил-радикалів.

Класифікацію газорідних кавітаційних пристроїв наведено в працях [15, 16].

З літературних джерел [17, 18] в умовах гідродинамічної кавітації можна виділити три зони, де мають місце хімічні процеси, ініційовані кавітацією:

- найбільш нагрітий газ всередині бульбашки – термодеструкція летких сполук і утворення ОН-радикалів;
- інтенсивні процеси на межі розділу рідина–газ;
- процеси в об'ємі рідини, куди дифундує велика кількість ОН-радикалів і де температура на кілька порядків нижча температури всередині бульбашки.

Як додатковий окиснювач в запропонованій системі доочищення використовується гідроген пероксиду, що є одним із сильних окиснювачів, які застосовуються зазвичай у вигляді 30 %-ного водного розчину.

Якщо порівняти “чисті” окиснювачі, наприклад озон, то гідроген пероксиду наділений цілим рядом технологічних переваг. Основною з них є можливість обробки стічних вод у широкому діапазоні значень концентрацій. Не менш важливою є висока селективність окиснювання різних домішок стічних вод при підборі умов проведення процесу. Другою перевагою застосування гідрогену пероксиду є його відносно висока стабільність на відміну від інших окиснювачів та проста апаратного оформлення процесу. Особливо слід відзначити, що залишкова концентрація  $H_2O_2$  в природних

водах на відміну від хлору відіграє позитивну роль.

Апаратне оформлення запропонованої технологічної схеми наведено на рис. 2. Дана система працює таким чином. Стічні води (гетерофазне середовище) надходять до резервуара усереднювача 1, де під дією коагулянта  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  [19] проходить розділення рідкої і твердої фаз з метою виділення завислих речовин.

Після видалення механічних домішок стічна вода надходить через відцентровий насос 2 в проточний кавітаційний ежектор 3, а потім направляється через редукційний клапан 4 в напірний флотатор 5. Сутність напірної флотації зводиться до насичення стічних вод повітрям при підвищеному тиску і наступним виділенням його з розчину у вигляді дрібних бульбашок із зменшенням тиску до атмосферного у флотаційному резервуарі [20]. Як флокулянт було використано високомолекулярний катіонний флокулянт Praeston 852 ( $20 \text{ мг/дм}^3$ ) [19]. Після знезараження концентрації фенолів до

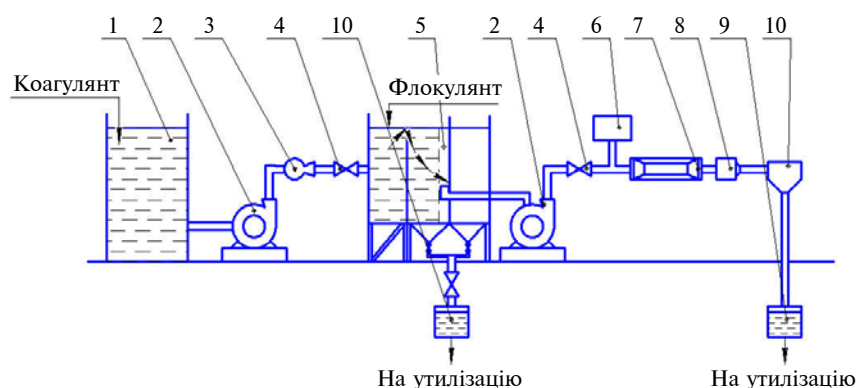


Рис. 2. Апаратне оформлення схеми доочищення стічних вод із кавітаційним аератором, напірним флотатором та кавітаційною системою: 1 – резервуар усереднювач; 2 – відцентровий насос; 3 – кавітаційний ежектор; 4 – редукційний клапан; 5 – напірний флотатор; 6 – резервуар для подачі гідрогену пероксиду; 7 – гідрокавітаційний реактор; 8 – кавітаційний ультразвуковий генератор; 9 – відстійник; 10 – резервуар для збору осаду

50 мг/л і зниження БПК і ХПК на 60–70 % вода надходить на доочистку. На цій ступені використовується гідроген пероксиду, який подається з резервуара 6 у магістраль перед кавітаційною системою, яка складається з гідрокавітаційного реактора 7 та кавітаційного ультразвукового генератора 8. Концентрація розчину гідрогену пероксиду визначається при проектуванні системи доочищення і уточнюється при налагодці системи залежно від концентрації забруднених речовин та інших параметрів стічних вод.

Для подальшого очищення вода надходить у відстійник 9, де проходить осаджування інтерментів, що утворилися на стадії АОР-процесу. Осад з відстійника збирається в резервуарі 10 і періодично виводиться. Після відстоювання очищена вода може бути використана вдруге.

## Висновки

У запропонованій технології очищення стічних вод від забруднень провідну роль відіграє комплексне використання дії потужних кавітаційних полів як АОР-процеси, які здатні справляти значний вплив на протікання гідро-, тепломасообмінних процесів, в тому числі на швидкість і ефективність водоочищення.

Технологія доочищення стічних вод від забруднень, в яку входять реагентні і безреагентні методи, дає можливість зекономити витрати коагулянтів і флокулянтів у процесі очищення води.

У подальшому потрібно розвивати розробки, які вважаються перспективними окиснювальними технологіями, що базуються на фізичних та хімічних методах і які здатні видаляти з води домішки до дуже низьких концентрацій.

Т.И. Веретельник, О.М. Яхно

### ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАВИТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Проведен анализ существующих методов очистки сточных вод. Предложена новая технологическая схема очистки вод с использованием устройств для генерирования кавитации.

T.I. Veretilnyk, O.M. Jachno

### THE TREATMENT TECHNOLOGY OF SEWAGES USING CAVITATION DEVICES

We analyze various treatment technologies of sewages. The focus is on our treatment technology of sewages using devices for generation of cavitations.

1. *Холодкевич С.В., Юцина Г.Г., Апостолова Е.С.* Перспективные методы обработки сточных вод // Экологическая химия. – 1996. – № 5. – С. 75–81.
2. *Окислители и технологии водообработки* / Под ред. М.А. Шевченко, П.В. Марченко, П.Н. Тарана, В.В. Лизунова. – К.: Наук. думка, 1979. – 178 с.
3. *Разумовский С.Д.* Озон в процессах восстановления качества воды // ЖВХО им. Д.И. Менделеева. – 1990. – 35, № 1. – С. 77–88.
4. *Семаков А.В., Скурлетов Ю.И., Козлов Ю.П.* Применение пероксида водорода в технологии очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 1999. – № 12. – С. 25–27.
5. *Веретельник Т.И.* Интенсификация процессов очистки сточных вод с использованием кавитации в системах водоочистки Черкасского ОАО “Азот” // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. Володимира Даля. – 2007. – 3(109), Ч. 1. – С. 30–34.
6. *Веретельник Т.И., Яхно О.М.* Очистка сточных вод с использованием эффектов кавитации // Вест. НТУУ “КПІ”. Машиностроение. – 2007. – № 51. – С. 87–93.
7. *Веретельник Т.И., Яхно О.М.* Экспериментальные исследования по определению влияния гидродинамической кавитации на основные показатели на городских очистных сооружениях // Наук. журн. “Екологічна безпека” КДПУ. – 2008. – Вип. 3-4. – С. 34–39.
8. *Сиротюк М.Г.* Акустическая кавитация. – М.: Наука, 2008. – 272 с.
9. *Розенберг Л.Д.* Кавитационная область // Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – Т. 2. – С. 221–226.
10. *Моисеев И.И.* Окислительные методы в технологии очистки воды и воздуха // Изв. АН. Сер. Химия. – 1995. – № 3. – С. 578–588.
11. *Гончарук В.В.* Фотокаталитическое деструктивное окисление органических соединений в водных средах //

- Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – № 5. – С. 345–355.
12. *Munter R.* Advanced oxidation processes-current status and prospects // Proc. Estonia Acad. Sci. Chem. – 2001. – P. 59–80.
  13. *Dowideir P., Fang X.* The fate of peroxylradicals in aqueous solution // Wat. Sci. Tech. – 1997. – 35, N 4. – P. 9–15.
  14. *Kulkarni A.A., Pandit A.B.* Techniquis of Wasterwater Treatment // RESONANCE. – 2000. – P. 64–74.
  15. *Мачинский А.С., Яхова Н.А., Марутовская Н.Н.* Кавитационные аппараты для очистки сточных вод. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 41 с.
  16. *Яхно О.М., Коваль А.Д., Пищенко Л.И. и др.* Кавитация в переработке нефти. – К.: Світ, 1999. – 264 с.
  17. *Левковский Ю.Л.* Структура кавитационных течений. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
  18. *Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф.* Кавитационная технология / Под ред. акад. Г.В. Логвиновича. – Красноярск: Изд-во КТУ, 1990. – 200 с.
  19. *Запольський А.К.* Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник. – К.: Вища шк., 2005. – 672 с.
  20. *Лукиных Н.А., Липман Б.Л., Криштул В.П.* Методы доочистки сточных вод. – М.: Стройиздат, 1978. – 156 с.

Рекомендована Радою  
Механіко-машинобудівного інституту  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
22 квітня 2010 року